



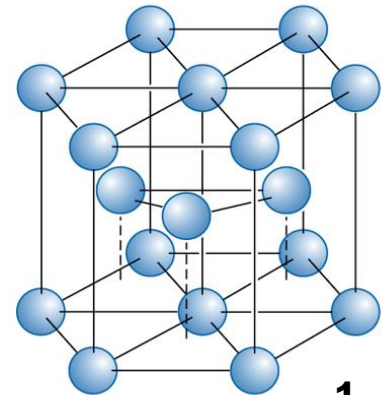
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística



Ensaaios Mecânicos dos Materiais – Compressão e Torção

**SMM0342- Introdução aos Ensaaios
Mecânicos dos Materiais**

Prof. Dr. Cassius O. F. Terra Ruchert

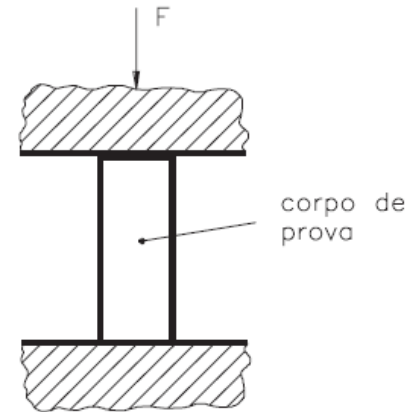


Resposta em Tração = Resposta em Compressão ???



- Alguns materiais possuem o comportamento em tração dramaticamente diferente do comportamento em compressão (materiais cerâmicos, FoFo, aços ferramenta, aço rápido); ou existem alguns processos de conformação onde a peça a ser trabalhada está sujeita a forças compressivas.
- Possui várias similaridades com o ensaio de tração e como o ensaio de tração foi tratado em detalhes, faremos somente algumas considerações onde estes ensaios diferem entre si.

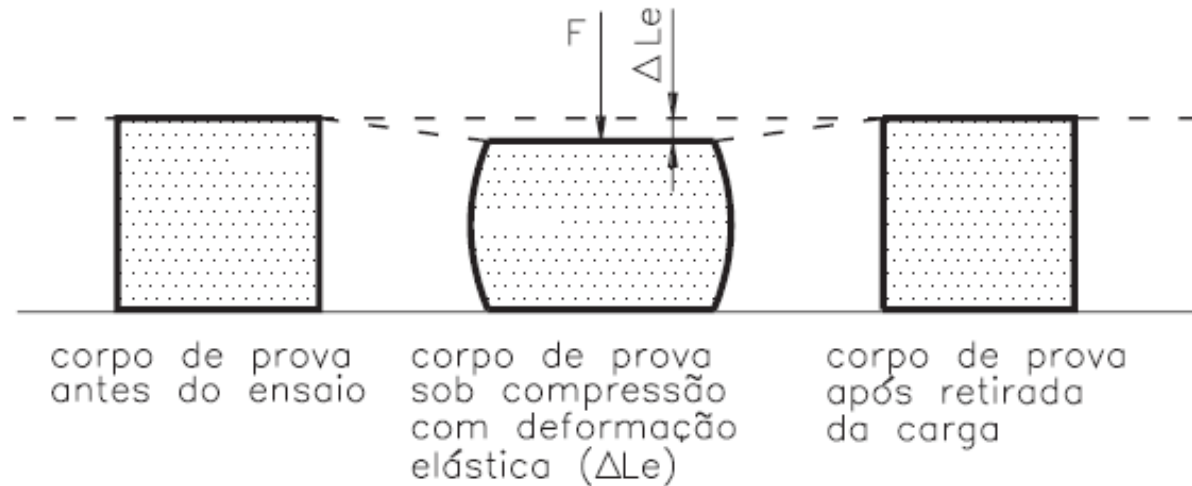
Ensaio de Compressão – ASTM E9M.



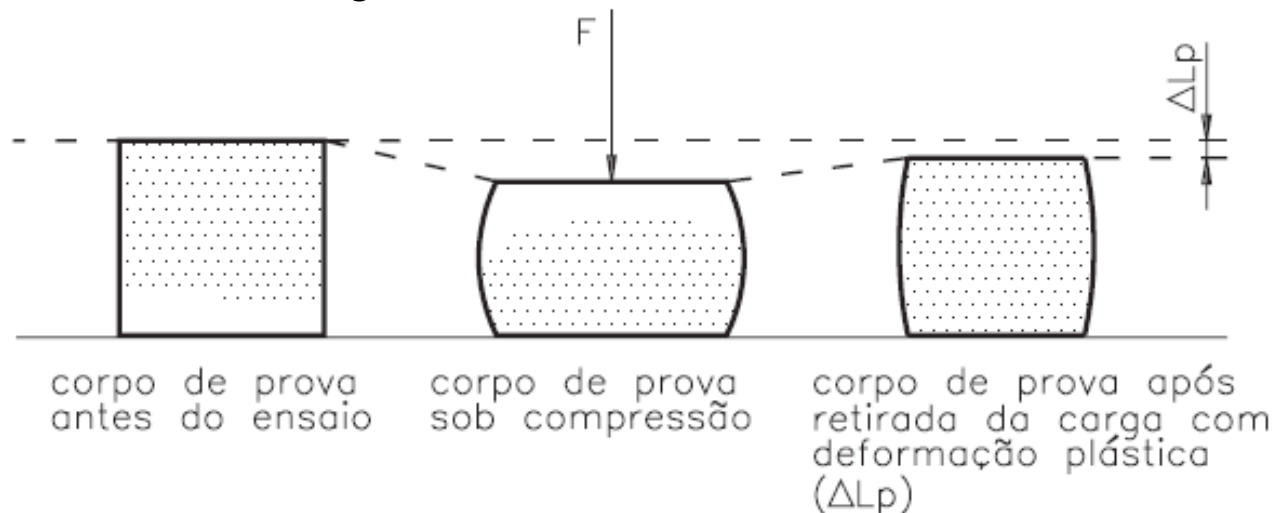
- O ensaio de compressão é a aplicação de carga compressiva uniaxial uniforme na seção transversal em um CP;
- A deformação linear obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo versus a carga de compressão consiste no resultado do ensaio;
- As propriedades mecânicas obtidas são as mesmas do ensaio de tração.

Comportamento de compressão em materiais
Dúcteis e Frágeis

Na fase de deformação elástica, o corpo volta ao tamanho original quando se retira a carga de compressão.



Na fase de deformação plástica, o corpo retém uma deformação residual depois de ser descarregado.



Ensaio Compressão

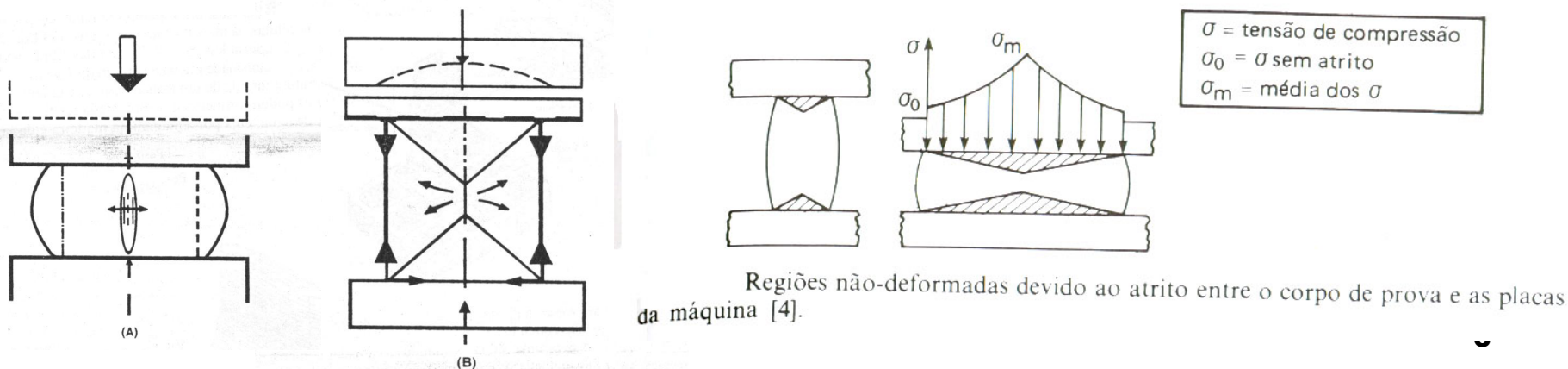


- Do mesmo modo que o ensaio de tração, o ensaio de compressão pode ser executado na máquina universal de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas - uma fixa e outra móvel;
- As relações que valem para a tração valem também para a compressão (Sofre Deformação Elástica + Plástica);
- A lei de Hooke também vale para a fase elástica da deformação, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais;
- As fórmulas para cálculo da tensão, da deformação e do módulo de elasticidade são semelhantes às que já foram demonstradas em aulas anteriores para a tensão de tração;
- Dados quantitativos é utilizado para parametrizar condições de processos de conformação;
- Sofre influência: defeitos superficiais, microestrutura, geometria e ambiente;

- O ensaio de compressão não é normalmente usado para metais porque existe uma série de dificuldades associadas à determinação das propriedades mecânicas a partir deste ensaio:

- existência de atrito entre a matriz (placa/base) e o corpo de prova.
- dificuldade de medidas dos valores numéricos dos ensaios.
- possibilidade de flambagem.
- os metais dúcteis (Fig. A) podem se deformar continuamente sem apresentar fratura, assim somente é possível determinar as propriedades relacionadas com a região elástica. A área da seção transversal do mesmo aumentará continuamente até se transformar em um disco, com isto a tensão verdadeira diminuirá.

- Por outro lado, materiais frágeis, por possuírem baixa capacidade de deformação plástica, como por exemplo FoFo, fraturam em um plano de 45° com a direção de aplicação de carga, ou seja, fratura nos planos de máxima tensões de cisalhamento como ilustrado na figura A.



Comparação de certas propriedades de alguns aços na tração e na compressão [3]

	Tração				Compressão		
	σ_p	σ_e (kgf/mm ²)	σ_r	E	σ_p	σ_e (kgf/mm ²)	E
AISI 1 035	44,1	46,9	67,9	21 000	46,9	49,7	21 000
AISI 1 046	52,5	56,0	84,0	21 000	54,6	59,5	21 000
AÇO 4 340	78,4	86,1	94,5	21 000	76,3	88,9	21 000

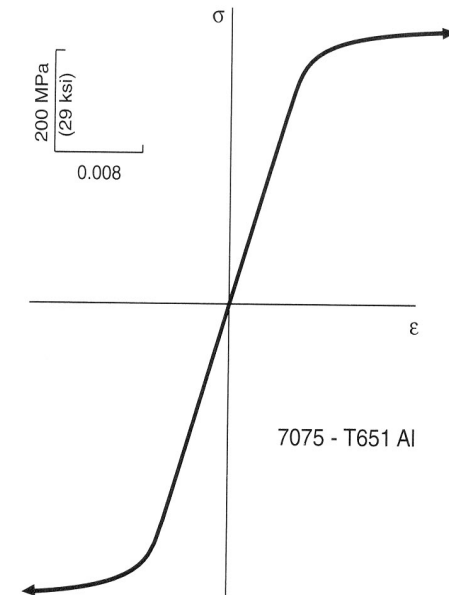
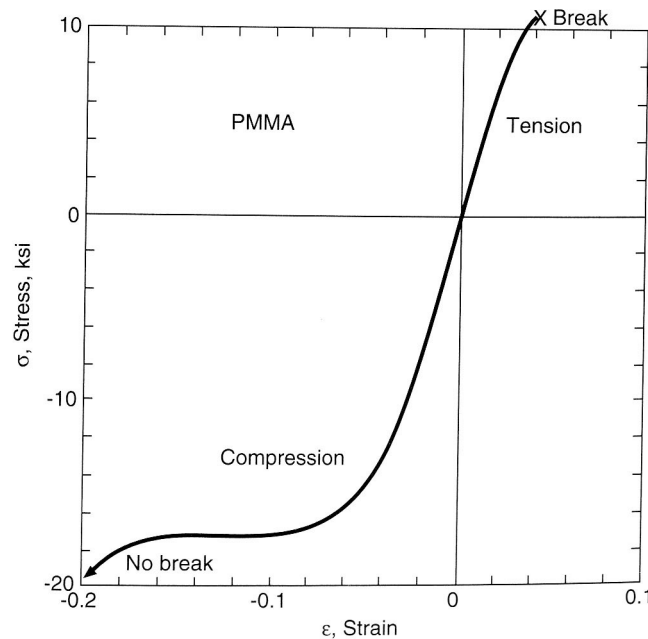
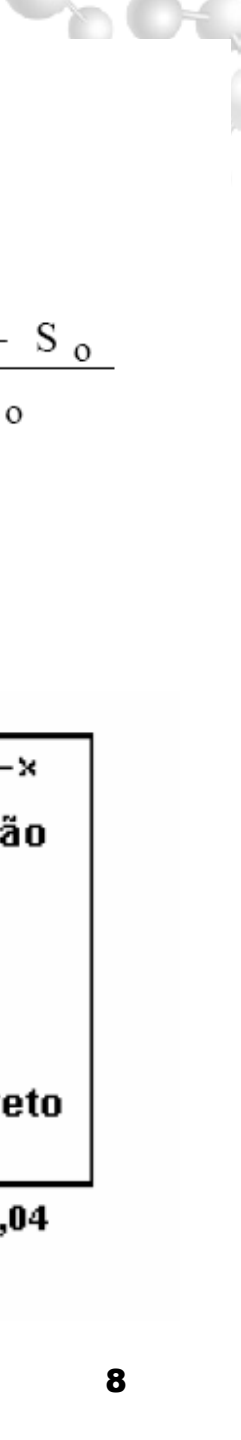


Figure 4.26 Stress-strain curves for plexiglass (acrylic, PMMA) in both tension and compression. (Adapted from [Richards 61] p. 153; reprinted by permission of PWS-Kent Publishing Co., Boston.)

Figure 4.25 Initial portions of stress-strain curves in tension and compression for 7075-T651 aluminum.



(σ_e) Limite de Escoamento :

Quando não apresentar um patamar nítido, utiliza-se da convenção de 0,2 % de deformação

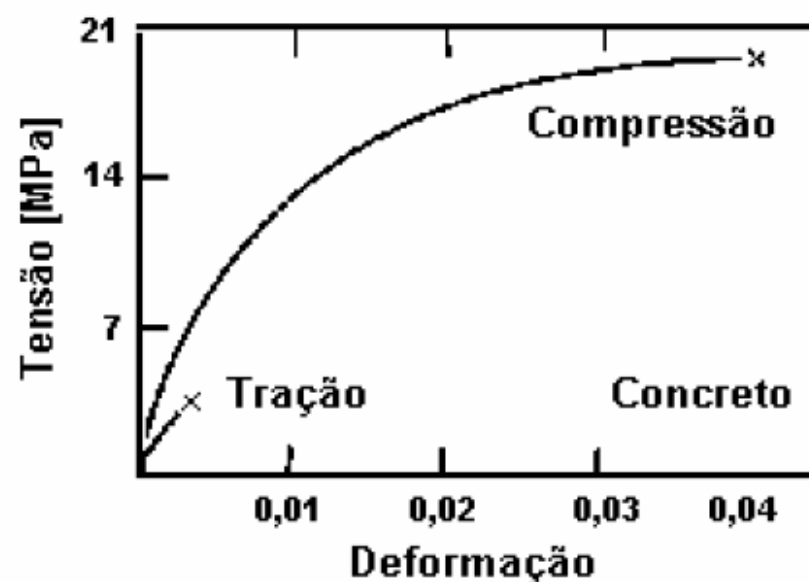
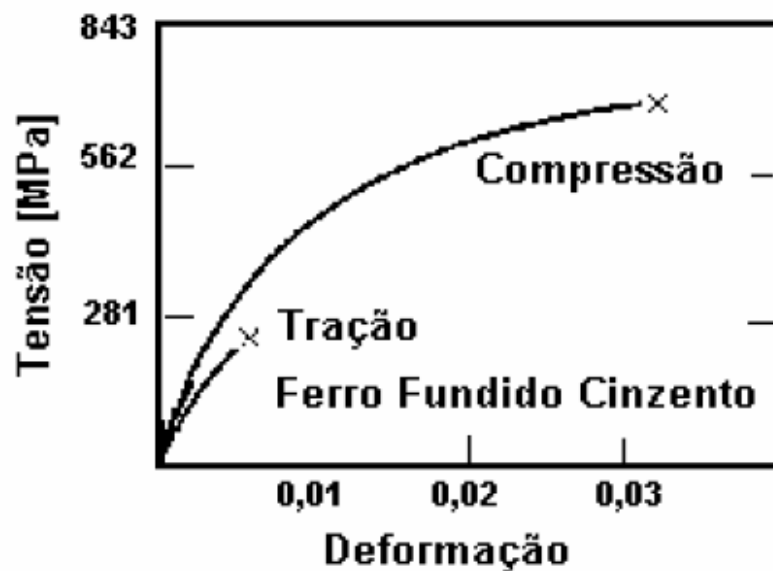
(ϕ) Dilatação Transversal :

Equivale ao coeficiente de estricção na tração

$$\phi = \frac{S_f - S_o}{S_o}$$

(σ_u) Limite de Resistência à Compressão :

Máxima tensão que pode suportar antes da fratura



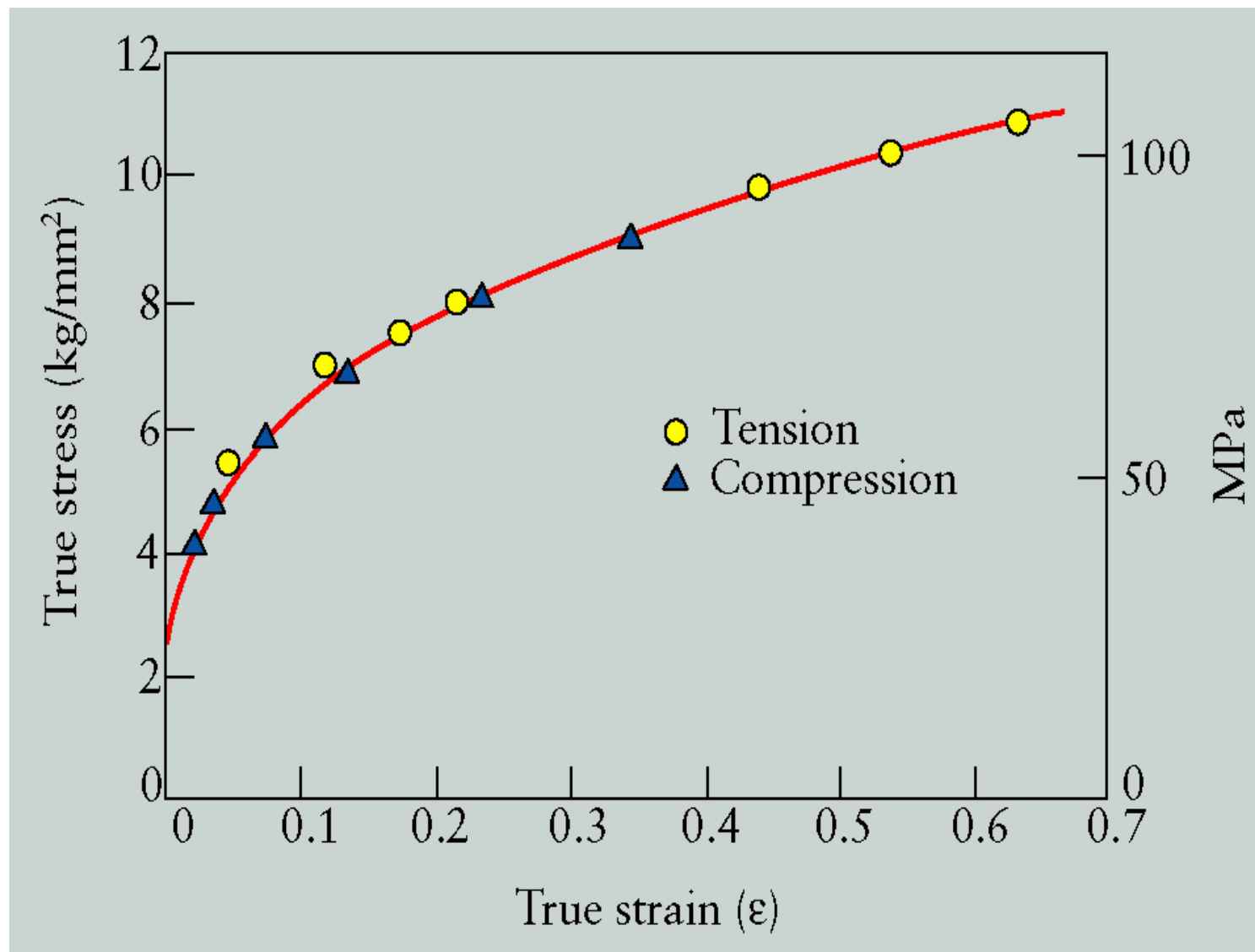


FIGURA 4 Curva tensão – deformação verdadeira em tração e compressão para o Al.

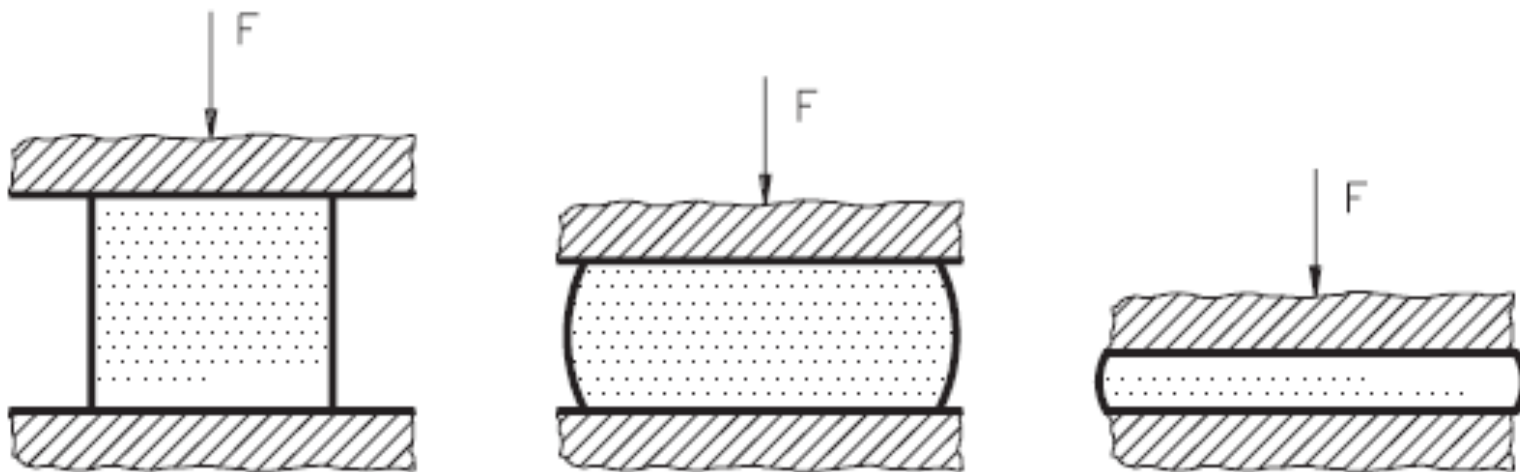
Curva $\sigma \times \varepsilon$ - Compressão



Curva Tensão-Deformação
Ensaio de Compressão



Ensaio de Compressão em Materiais Dúcteis

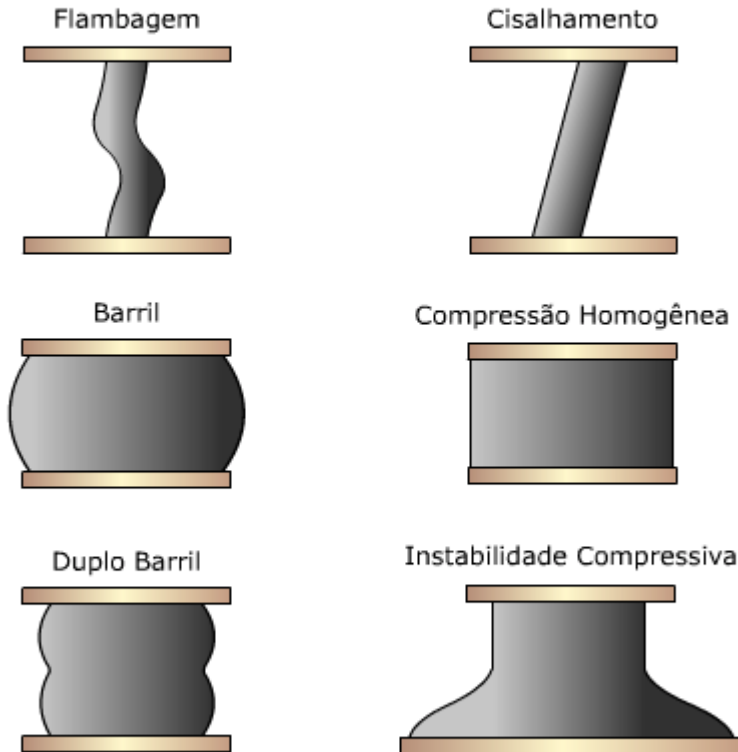


- Nos materiais dúcteis a compressão vai provocando uma deformação lateral apreciável até o CP se transformar num disco, sem que ocorra a ruptura.
- É por isso que o ensaio de compressão de materiais dúcteis fornece apenas as propriedades mecânicas referentes à zona elástica.
- As propriedades mecânicas mais avaliadas por meio do ensaio são: limite de proporcionalidade, limite de escoamento e módulo de elasticidade.

Modos de Deformação – Material Dúctil



Modos de Deformação



clique nas figuras

(a) Flambagem, quando $L/D > 5$

(b) Cisalhamento, quando $L/D > 2,5$

(c) Barril duplo, quando $L/D > 2,0$

(d) Barril, quando $L/D > 2,0$ e há fricção nas superfícies de contato

(e) Compressão homogênea, quando $L/D < 2,0$ e não existe fricção nas superfícies de contato

(f) Instabilidade compressiva devido ao amolecimento do material por efeito de carga.

A flambagem, o cisalhamento e a instabilidade devem ser evitados

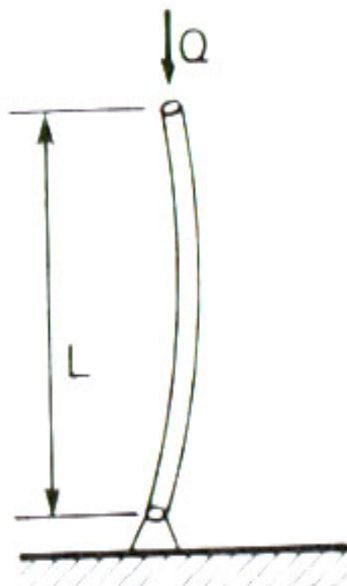
Flambagem

No ensaio de compressão, evita-se a flambagem elástica (instabilidade na compressão de um material dúctil) dimensionando-se o CP, de modo a se obter uma tensão máxima menor que a tensão crítica que provocaria a flambagem.

$$Q_c = \frac{\pi^2 EJ}{4L^2}$$



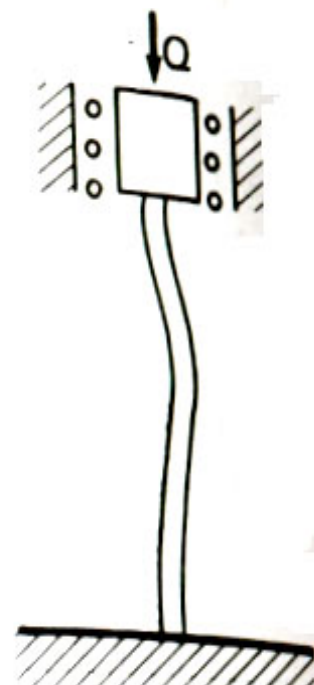
$$Q_c = \frac{\pi^2 EJ}{L^2}$$



$$Q_c = \frac{20,2 EJ}{L^2}$$

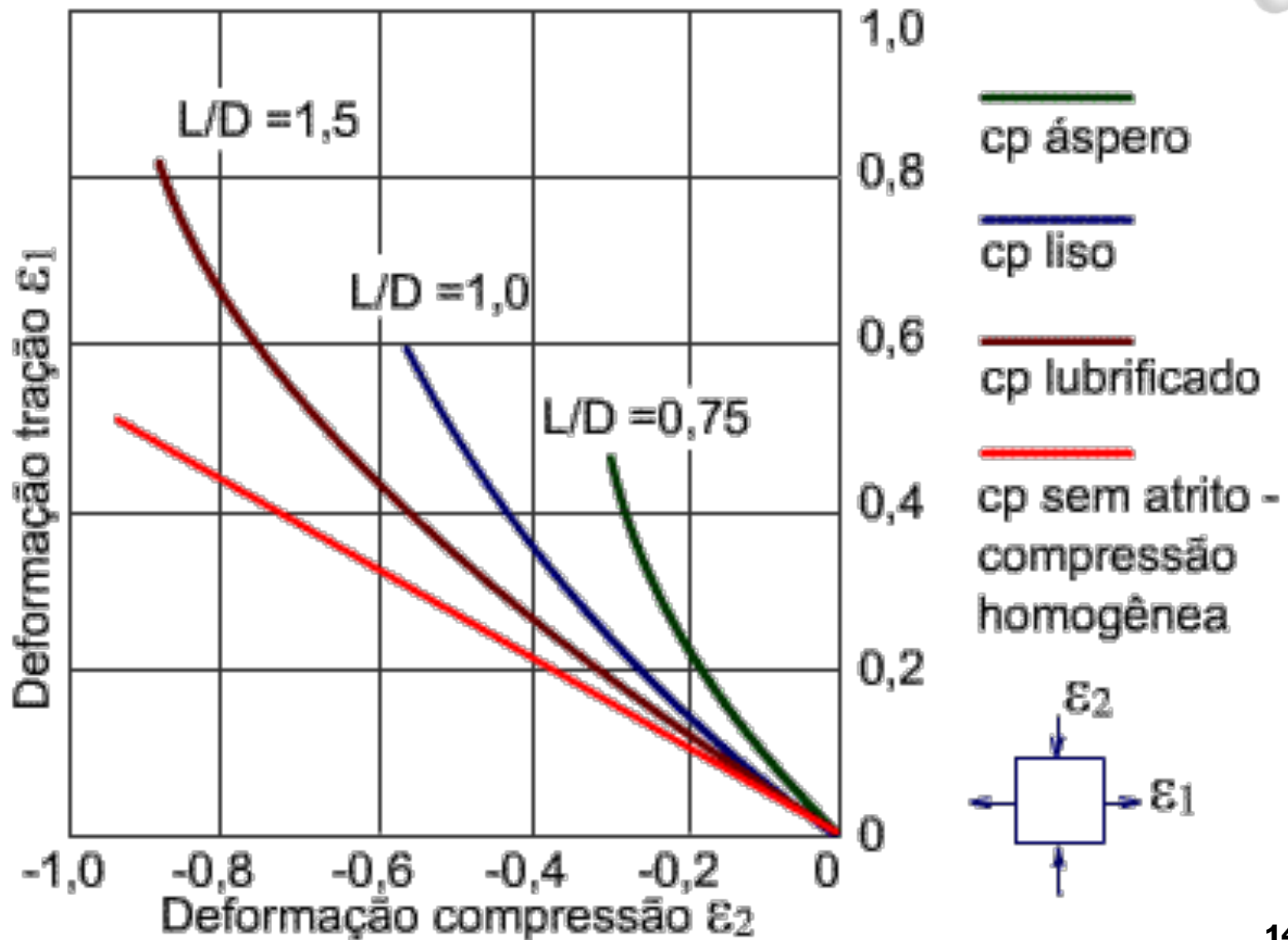


$$Q_c = \frac{4\pi^2 EJ}{L^2}$$



Algumas maneiras de fixação de corpos de prova para estudo da flambagem. Na figura são mostradas as diversas cargas críticas para cada tipo de fixação

Efeito da Rugosidade entre Placa e CP





Dimensões do Corpo de Prova

- Dimensões dos corpos de prova ensaiados em compressão segundo a Norma ASTM E9-89

Corpo de Prova	Diâmetro, mm	Comprimento, mm
-Pequeno	$30 \pm 0,2$	$25 \pm 1,0$
	$13 \pm 0,2$	$25 \pm 1,0$
-Médio	$13 \pm 0,2$	$38 \pm 1,0$
	$20 \pm 0,2$	$60 \pm 3,0$
	$25 \pm 0,2$	$75 \pm 3,0$
	$30 \pm 0,2$	$85 \pm 3,0$
-Longo	$20 \pm 0,2$	$160 \pm 3,0$
	$32 \pm 0,2$	320

Relação h_0/D_0

Dúcteis : 3 a 8

Frágeis : 2 a 3

Ensaio de Compressão



- Em função de trincas submicroscópicas os materiais frágeis são geralmente fracos em condições de tração, já que as tensões de tração tendem a propagar essas trincas
- Materiais frágeis como as cerâmicas apresentam porém alta resistência à compressão

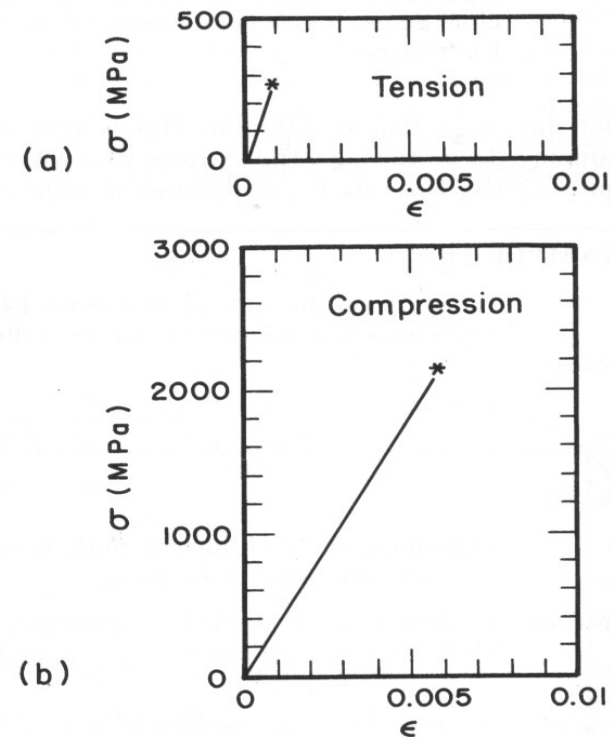


Figure 3.29 (a) Tensile strength and (b) Compressive strength of Al_2O_3 .

Resultados de ensaios de compressão

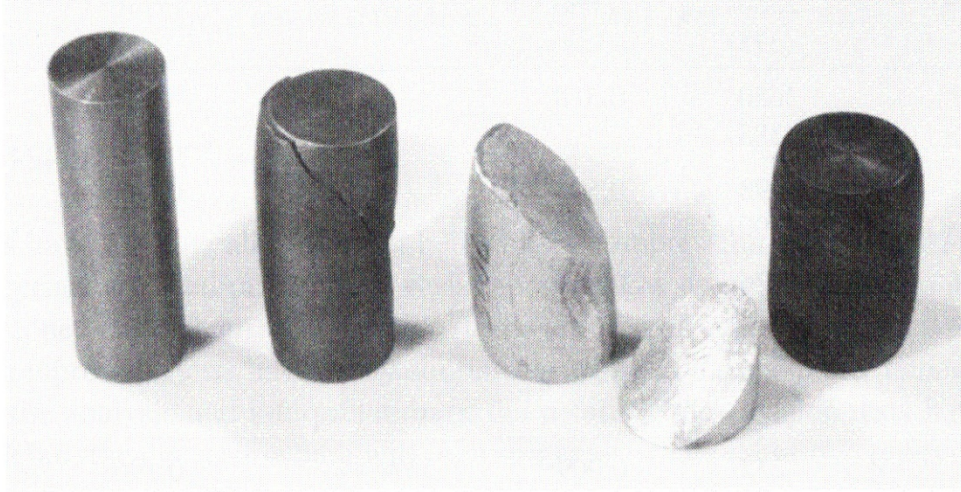


Figure 4.23 Compression specimens of metals (left to right): untested specimen, and tested specimens of gray cast iron, aluminum alloy 7075-T651, and hot-rolled AISI 1020 steel. Diameters before testing were approximately 25 mm, and lengths were 76 mm. (Photo by R. A. Simonds.)

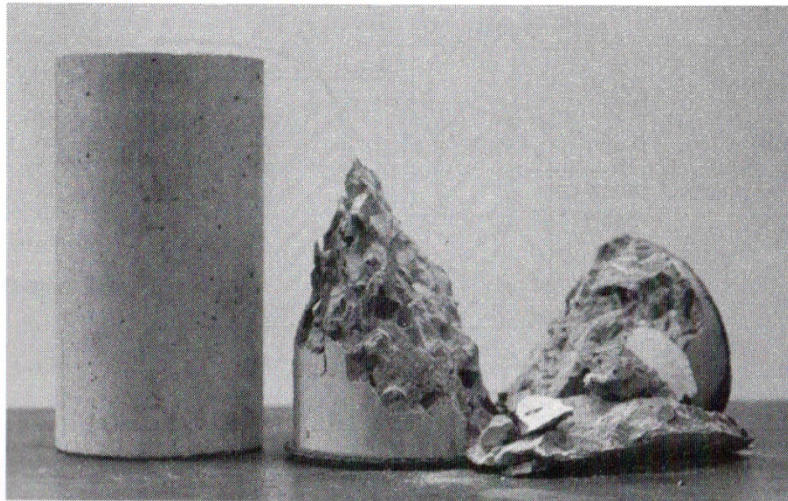
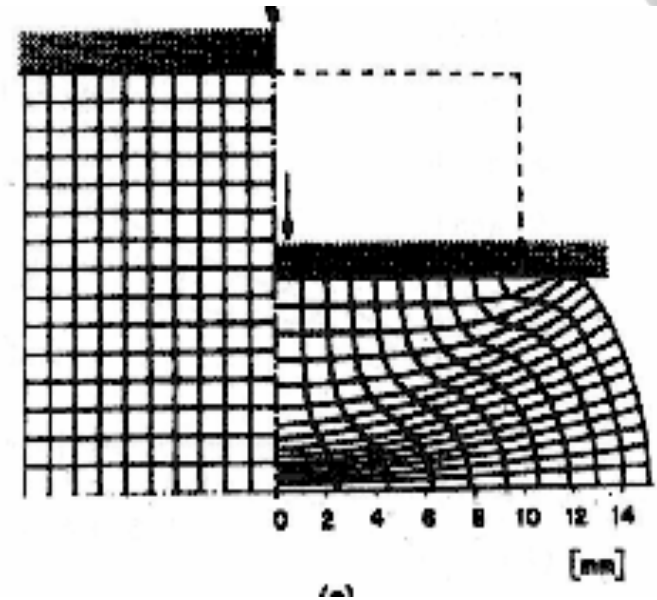


Figure 4.24 Untested and tested 150 mm diameter compression specimens of concrete with Hokie limestone aggregate. (Photo by R. A. Simonds.)

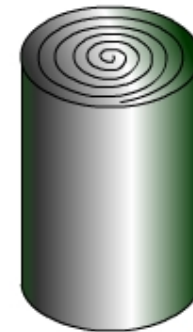


Ensaio de compressão: Embarrilhamento

- Durante o ensaio de compressão, as faces do corpo de prova que estão em contato direto com as placas sofrem uma resistência que se opõe ao escoamento do material devido às forças de atrito.
- Isto leva a um corpo de prova em forma de barril (embarrilhamento) tornando necessário a determinação das tensões e deformações verdadeiras;
- Os fatores atrito e relação L/D atuam conjuntamente, tanto no modo como nos valores da deformação.



Corpo de prova mostrando os sulcos usados para reter o material de lubrificação



■ Resultado do ensaio na forma de gráficos: Carga (P) x Deslocamento (ΔL).

CORPO DE PROVA:

geralmente barra cilíndrica, mas pode ser aplicado para qualquer geometria (esforços normais e radiais); comprimento l e diâmetro D ;

PROPRIEDADES OBTIDAS:

Tensão Convencional :

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} = \frac{4 \cdot P}{(\pi \cdot D_0^2)}$$

Tensão Real :

$$\sigma_r = \frac{P}{S} = \frac{4 \cdot P}{(\pi \cdot D^2)}$$

como $V = V_0$

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h$$

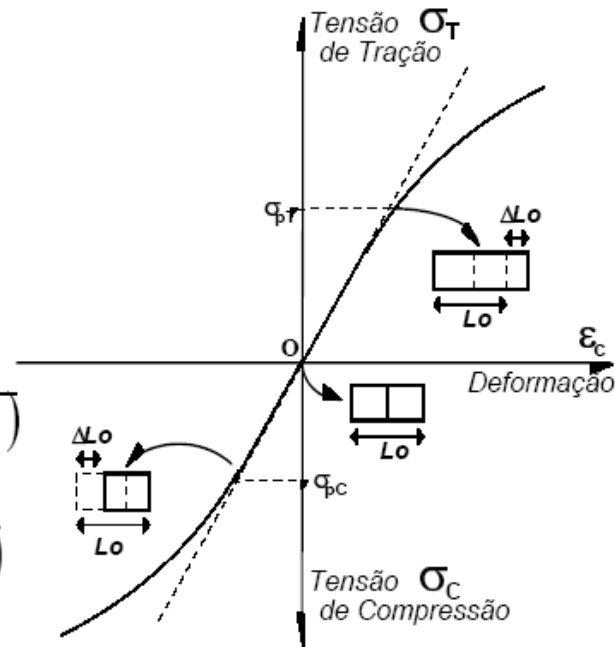
$$D^2 = D_0^2 \cdot \left(\frac{h_0}{h} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{4 \cdot P \cdot h}{\pi \cdot D_0^2 \cdot h_0}$$

Deformação Real :

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} = - \left(1 - \frac{h}{h_0} \right)$$

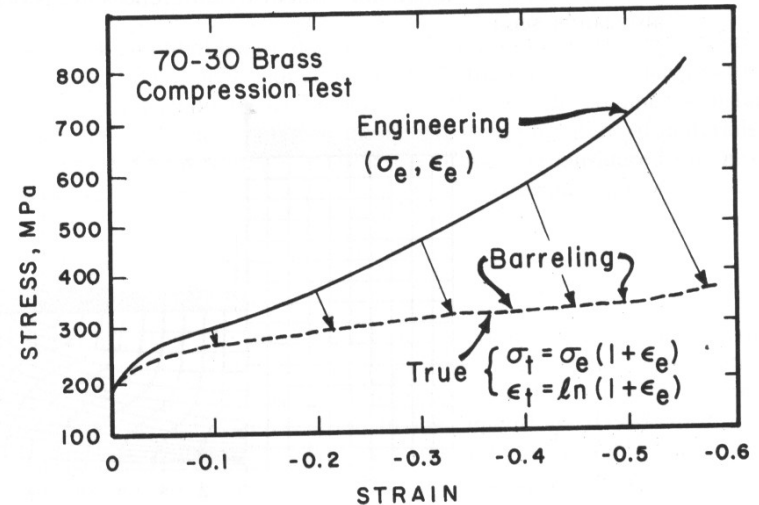
$$\varepsilon_r = \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \ln \frac{h}{h_0} = - \ln \frac{h_0}{h}$$



Tensões e Compressões Verdadeiras

➤ Tensão Verdadeira:

$$\sigma_r = \frac{4.P.h}{\pi.D_0^2.h_0}$$

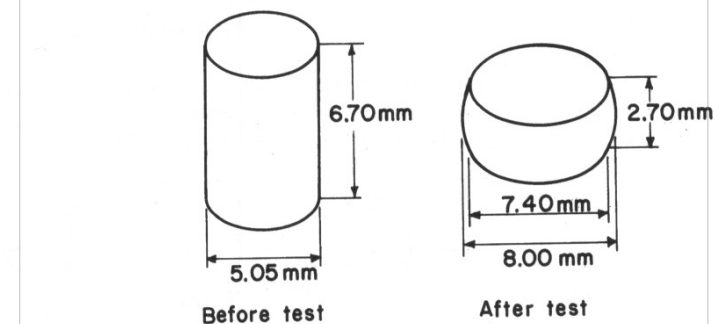


(a)

The image cannot be displayed. Your computer may not have enough memory to open the image, or the image may have been corrupted. Restart your computer, and then open the file again. If the red x still appears, you may have to delete the image and then insert it again.

➤ Deformação Verdadeira:

$$\epsilon_r = -\ln \frac{h_0}{h}$$



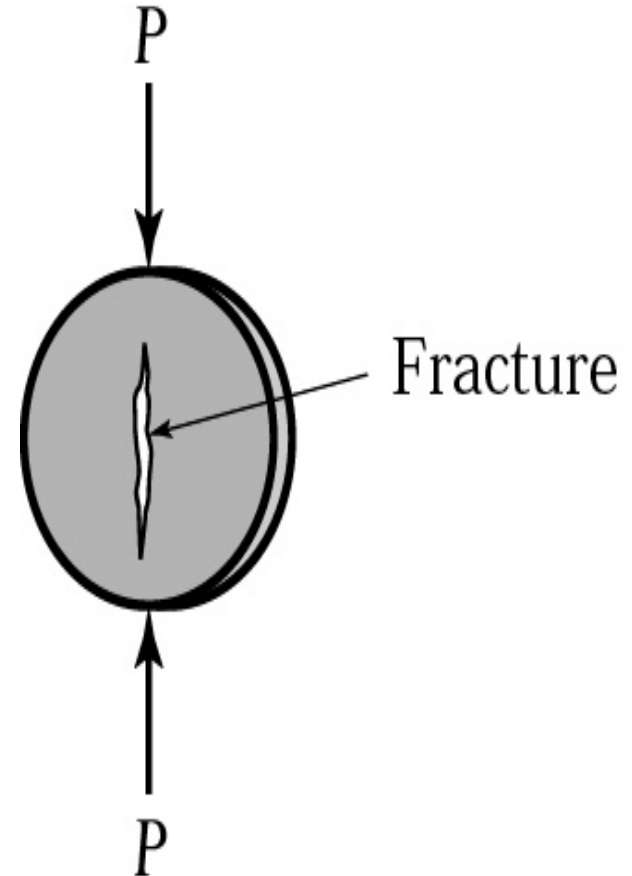
(b)

Figure 3.14 (a) Stress-strain (engineering and true) curves for 70-30 brass in compression. (b) Change of shape of specimen and barreling.

Teste de Compressão de Discos



- Desenvolvido para materiais frágeis, tal como cerâmicas e vidros.
- O disco é submetido a compressão entre matrizes duras e planas.
- Quando o material é carregado, tensões trativas são desenvolvidas perpendicular a linha de centro ao longo do disco, a fratura começa e o disco é verticalmente dividido ao meio.



Ensaio de Torção



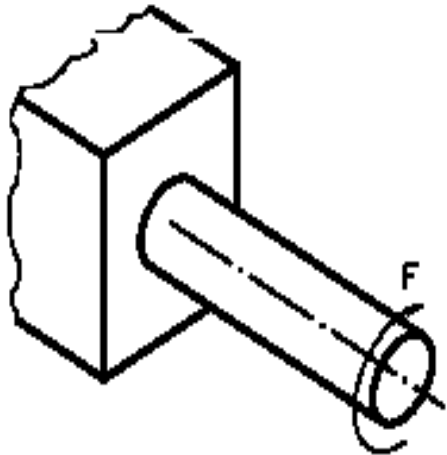
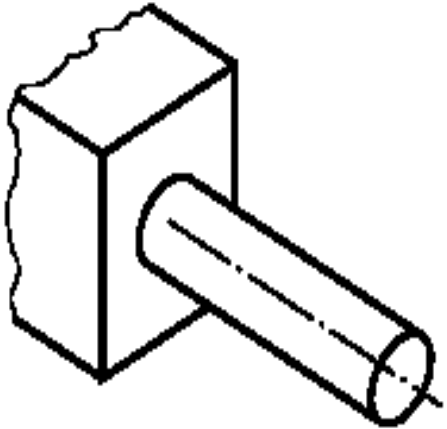
- Já lhe aconteceu de estar apertando um parafuso e, de repente, ficar com dois pedaços deste nas mãos. O esforço de torção é o responsável por estragos como esse.
- E o que dizer de um virabrequim de automóvel, dos eixos de máquinas, polias, molas helicoidais e brocas?
- Em grande parte destes produtos, o maior esforço mecânico é o de torção ou seja, quando estes quebram é porque não resistiram a torção.
- A torção é diferente da compressão, da tração e do cisalhamento porque nestes casos o esforço é aplicado no sentido longitudinal ou transversal, e na torção o esforço é aplicado no sentido de rotação.
- O ensaio de torção é de execução relativamente simples, porem para obter as propriedades do material ensaiado são necessários cálculos matemáticos complexos.
- Como na torção uma parte do material está sendo tracionada e outra parte comprimida, em casos de rotina podemos usar os dados do ensaio de tração para prever como o material ensaiado se comportar quando sujeito a torção.
- O ensaio de torção não é tão largamente empregado como o ensaio de tração.
- É muito útil para aplicações de engenharia e no estudo teórico de deformações.

Ensaio de Torção

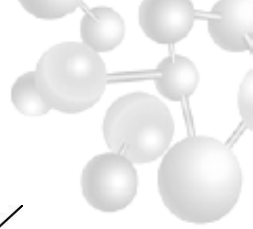


O eixo de transmissão dos caminhões é um ótimo exemplo para ilustrar como atua este esforço.

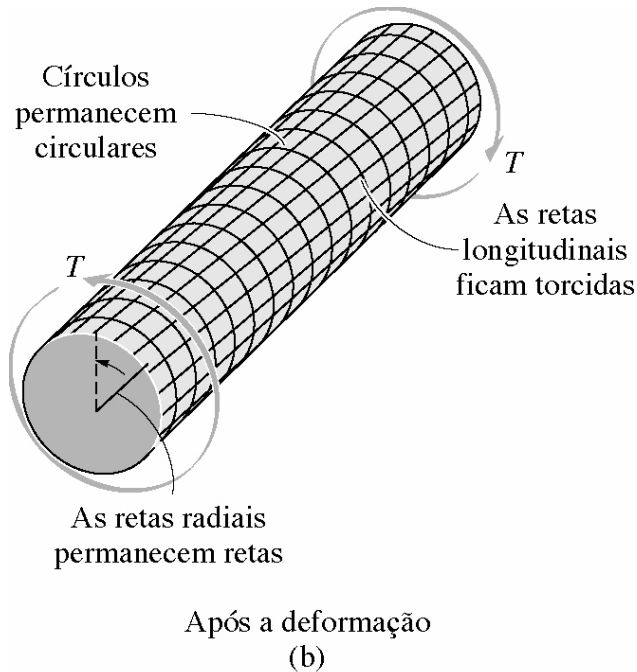
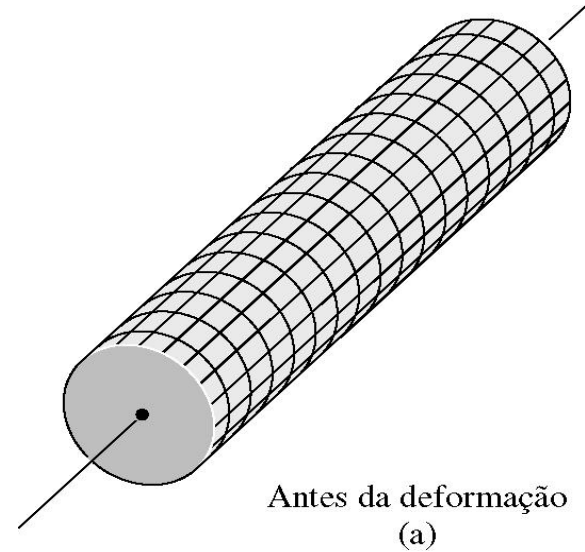
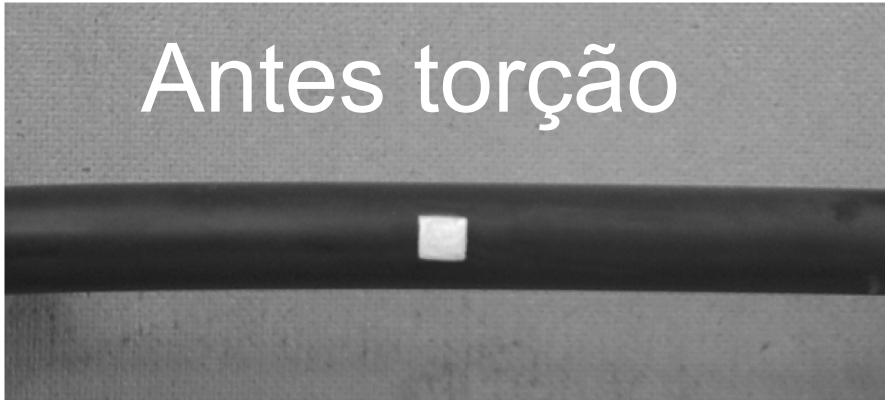
- Uma ponta do eixo está ligada à roda, por meio do diferencial traseiro.
- A outra ponta está ligada ao motor, por intermédio da caixa de câmbio.
- O motor transmite uma força de rotação a uma extremidade do eixo.
- Na outra extremidade, as rodas oferecem resistência ao movimento.
- Como a força que o motor transmite é maior que a força resistente da roda, o eixo tende a girar e, por consequência, a movimentar a roda.



Torção em Eixos Circulares



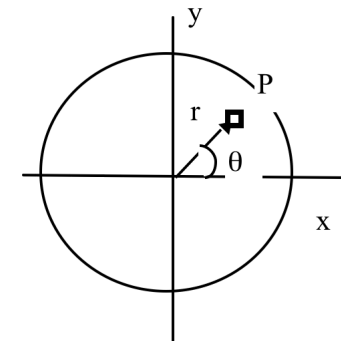
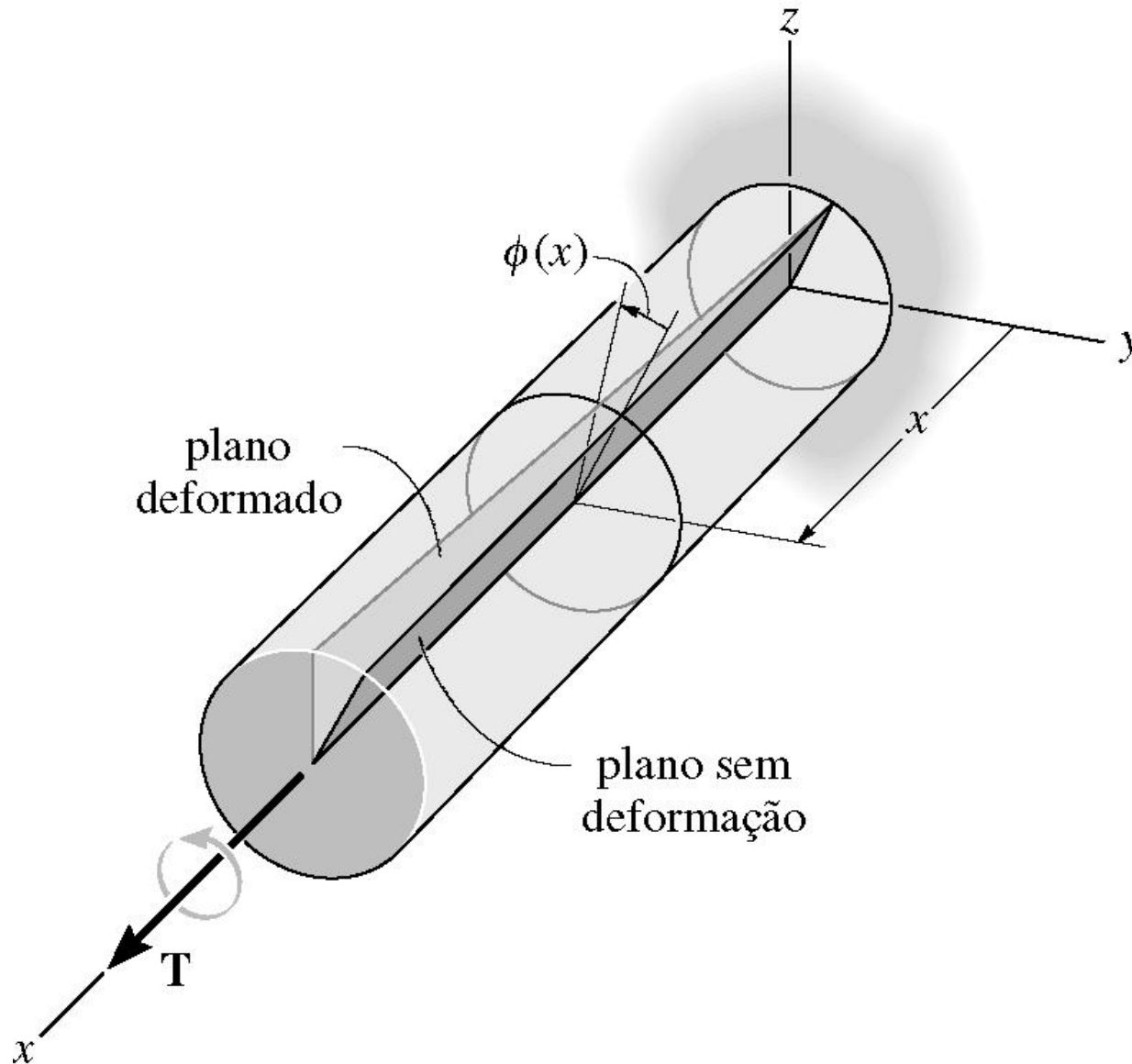
Antes torção



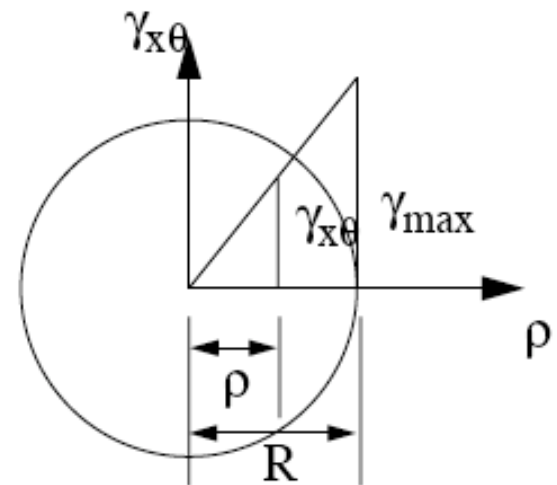
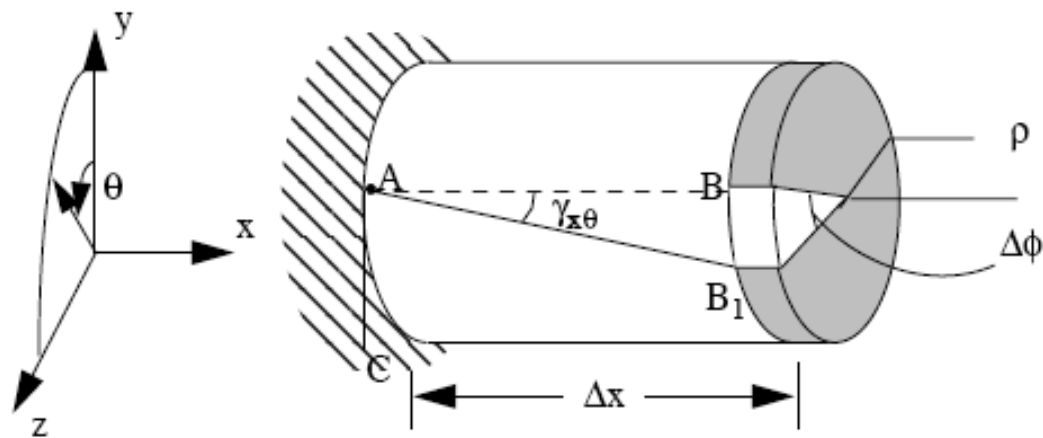
Depois torção



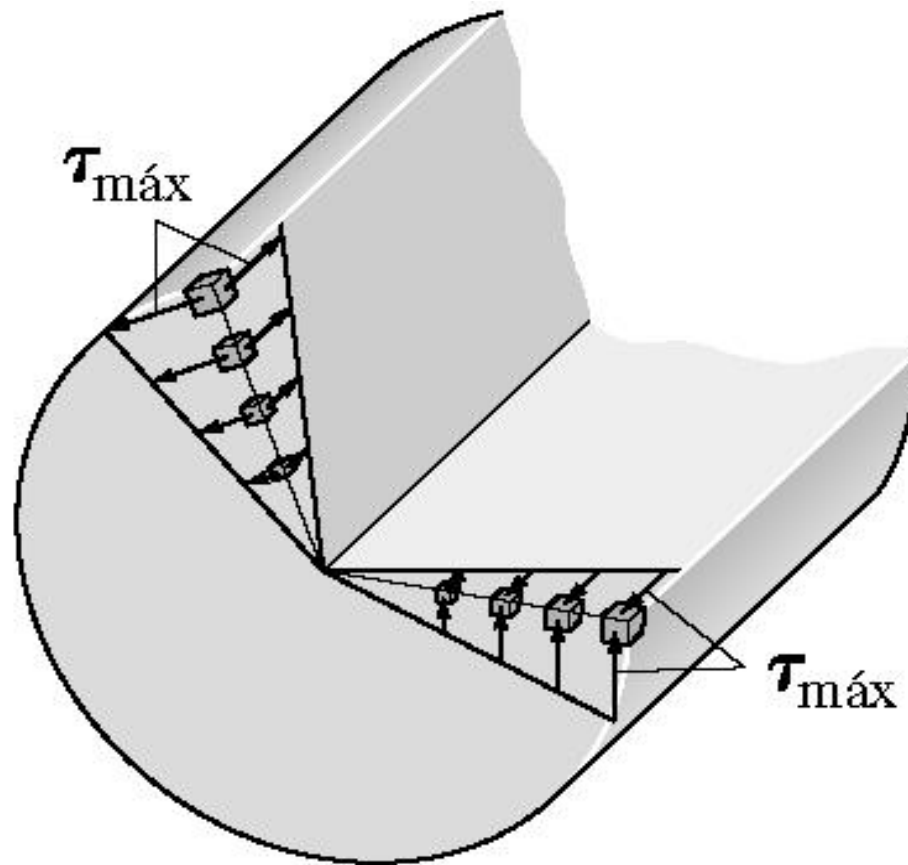
Sistema de Coordenadas



Deformação Angular



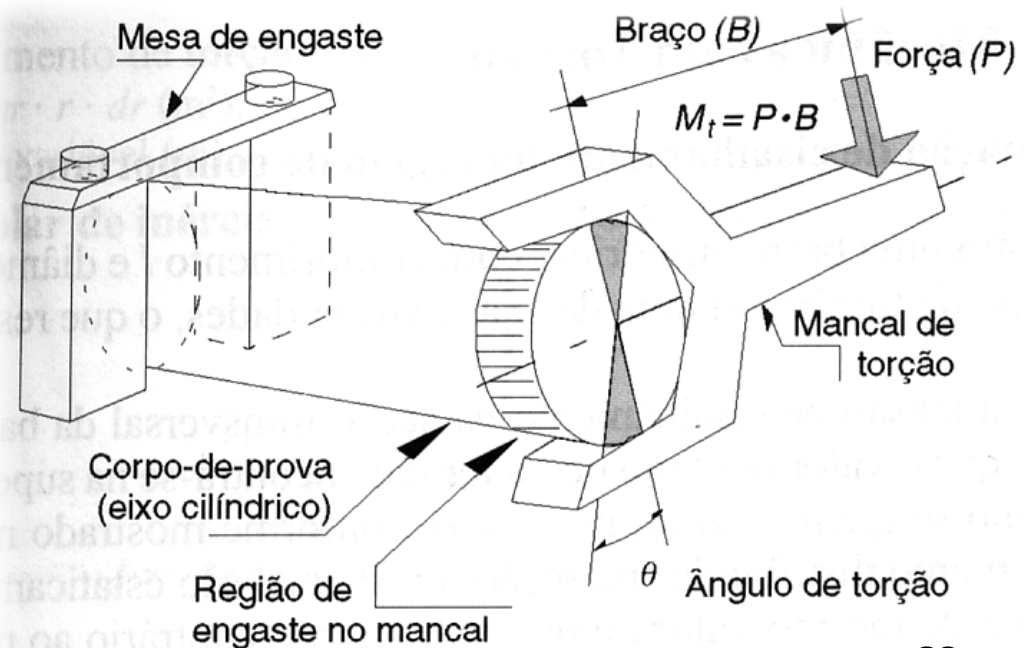
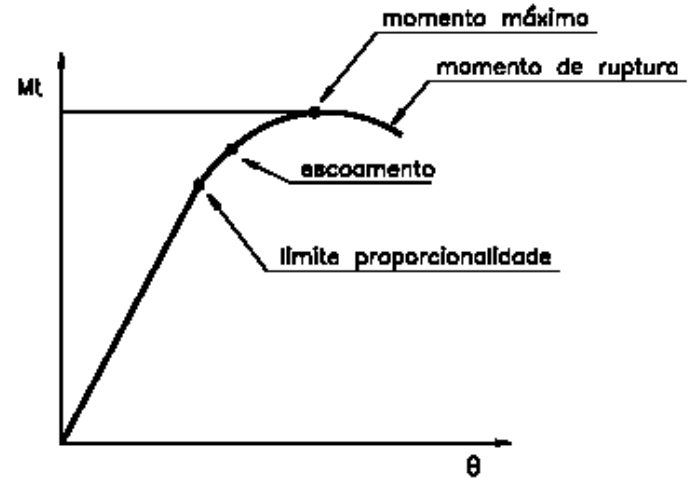
Perfil de Tensão Cisalhante



A tensão de cisalhamento varia linearmente ao longo de cada reta radial da seção transversal.

Ensaio de Torção

- O Ensaio de torção consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova geralmente de geometria cilíndrica;
- Mede-se o ângulo de torção como função do momento torsor aplicado;
- Muito utilizado na indústria de componentes mecânicos como motores de arranque, turbinas aeronáuticas, rotores de máquinas pesadas, barras de torção, molas etc...



Ensaio de torção

As propriedades principais obtidas no ensaio de torção são:

- Limite de escoamento à torção

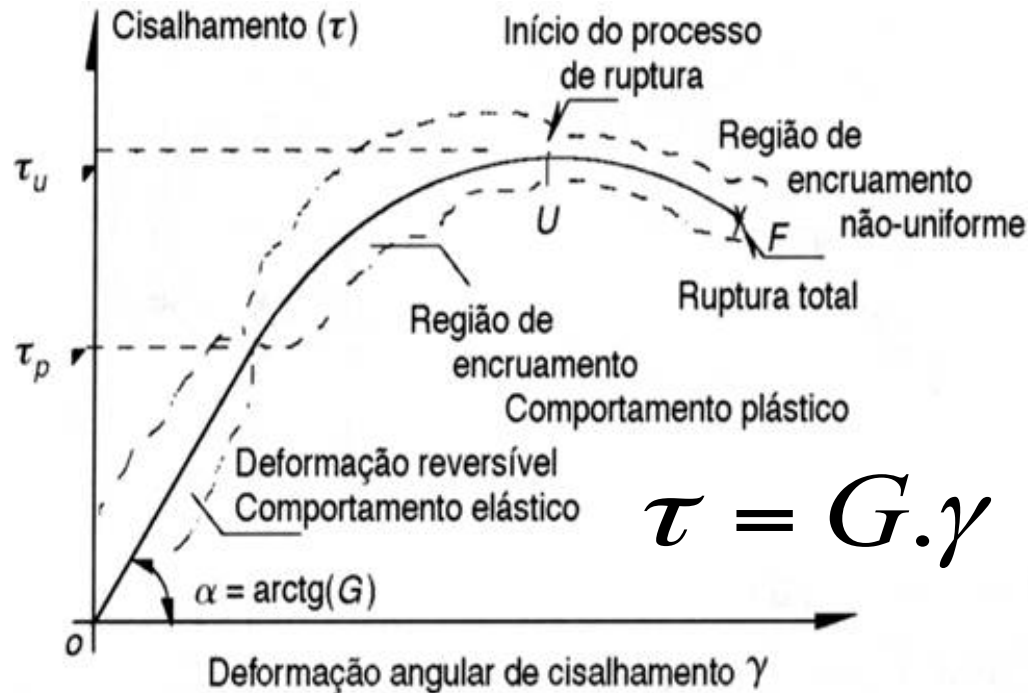
$$\tau_e$$

- Módulo de ruptura à torção

$$\tau_u$$

- Módulo de elasticidade transversal

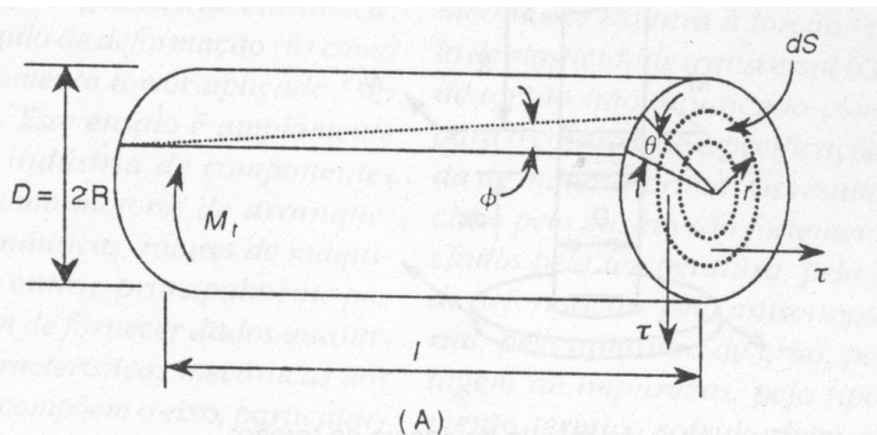
$$G$$



G = módulo de elasticidade transversal (ensaio de torção)

τ = Tensão de cisalhamento

γ = Deformação de cisalhamento



$$M_T = \int_{r=0}^{r=a} \tau r dA = \frac{\tau}{r} \int_0^a r^2 dA$$

Momento polar de inércia, J

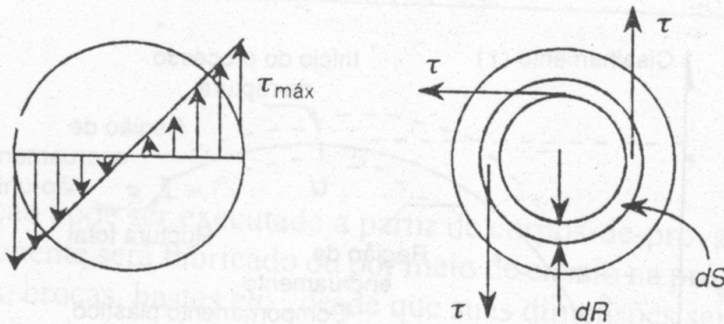
$$M_T = \frac{\tau J}{r} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{M_T r}{J}$$

τ = tensão de cisalhamento, MPa

M_T = momento torsor, N.m

r = dist. radial medida do centro da barra, m

J = momento polar de inércia, m⁴



Como a tensão máxima de cisalhamento se verifica na superfície e o momento polar de inércia de uma seção circular é:

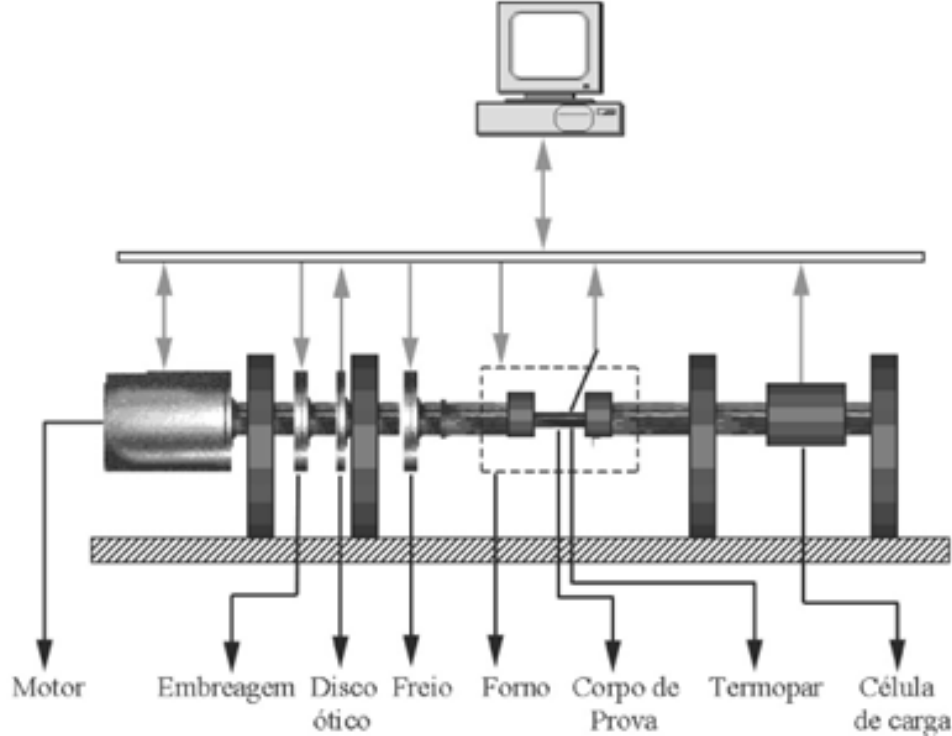
$$J_p = \frac{\pi M_T r}{32} \quad \Rightarrow \quad \tau_{\max} = \frac{16 M_T}{\pi D^3}$$

Para um corpo tubular tem-se:

$$\tau_{\max} = \frac{16 M_{T \max} D_1}{\pi (D_1^4 - D_2^4)}$$

The diagram shows a mechanical system. On the right, a motor labeled M is connected to a shaft at point A . The shaft extends to the left, passing through a pulley. At the end of the shaft on the left is a support labeled B . A curved blue arrow around the shaft indicates a rotation with angular velocity ω .

31



Representação esquemática e foto da máquina horizontal de ensaios de torção a quente.



Ensaio de Torção

Ensaio padronizado pela norma **ASTM E588-83**. Entre as principais recomendações e providências necessárias para a realização do ensaio, podem-se citar:

- A fixação das extremidades do CP na máquina deve ser tal que não ocorra danos ou destruição das mesmas, ocasionando pontos de nucleação de trincas e conseqüentemente fratura.
- A distância entre as fixações será considerada o comprimento útil do corpo de prova (l).
- A rotação ou giro do CP deverá ocorrer apenas ao longo do comprimento útil e não na região engastada.
- O equipamento deverá ser dotado de um dispositivo de leitura de giro, diminuindo possíveis erros do operador nas medidas (ex. encoder)
- Como a tensão máxima de cisalhamento ocorre na superfície, recomenda-se que esta seja sem defeitos ou marcas que podem mascarar o comportamento do componente como um todo, não revelando o total de sua capacidade.
- A velocidade de giro deve ser pequena, e medida em rpm ou rps.

Ensaio de Torção

$M_t \text{ (N} \cdot \text{m)}$

$M_{t \text{ esc}}$

LP

$r = \text{média dos diâmetros}$
 $R = \text{Raio}$

$$\tau_e = \frac{M_{Te} R}{J_p} \quad (\text{secção circular}),$$
$$\tau_e = \frac{M_{Te}}{2\pi r^2 e} \quad (\text{secção tubular}).$$

$\text{+ + } (0,057 \text{ graus} = 0,001 \text{ rad}) \quad \theta \text{ (rad)}$

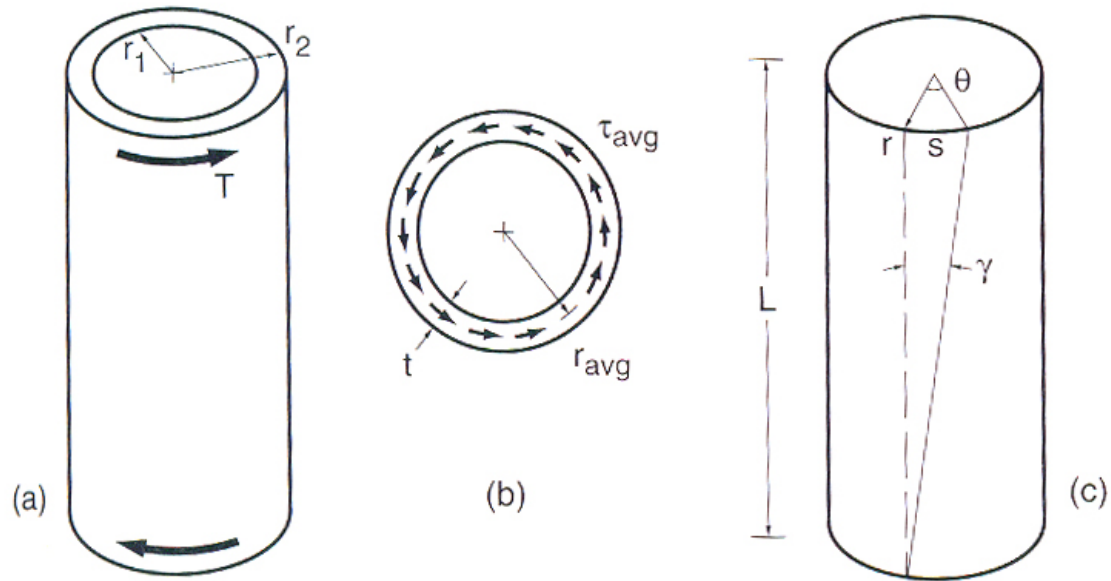
De modo similar ao ensaio de tração, o limite de proporcionalidade (LP) pode ser determinado pelo final da linearidade entre a tensão de cisalhamento e deformação e o escoamento pelo offset.

Ensaio de Torção (TUBO PAREDE FINA)

Corpo de prova típico de ensaio de torção. Ele é montado entre duas garras da máquina e é torcido. Note a tensão de cisalhamento média τ_{avg} e a deformação de cisalhamento média γ

$$G = \frac{M_T L}{2\pi(\phi_{avg})^3 e \theta}$$

$\Theta = \text{radianos}$



(a) tubo de parede fina ($e < d_{ext}/10$) em torção (b) tensão de cisalhamento τ_{avg} aproximadamente uniforme na seção e (c) ângulo θ e deformação angular de cisalhamento γ .

$$\tau_{avg} = \frac{M_T}{2\pi\phi_{avg}^2 e}$$

$$\gamma_{avg} = \frac{r_{avg}\theta}{L}$$

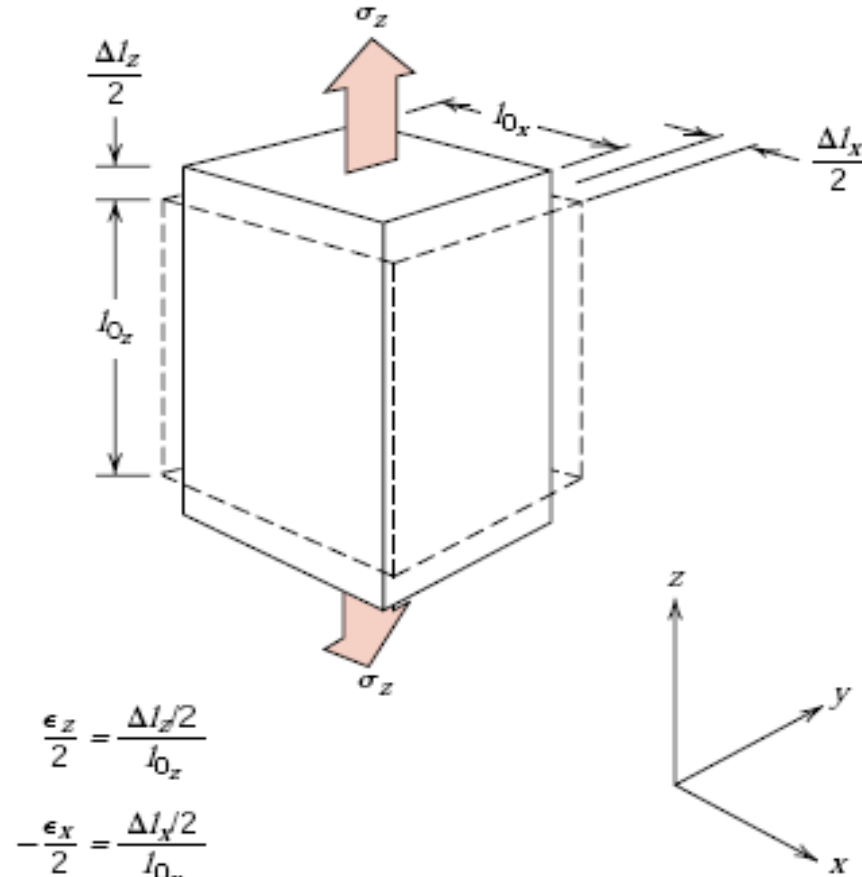
$$r_{avg} = \frac{r_2 + r_1}{2}$$

Coeficiente de Poisson

➤ É o coeficiente que mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada. No ensaio de tração é o quociente entre a deformação lateral (ϵ_x) e a deformação na direção da tensão (ϵ_z) para materiais isotrópicos

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

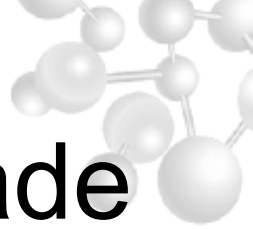
➤ Para materiais isotrópicos, o módulo de elasticidade está relacionado com o coeficiente de Poisson



Relação entre G e E :

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Valores de módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson

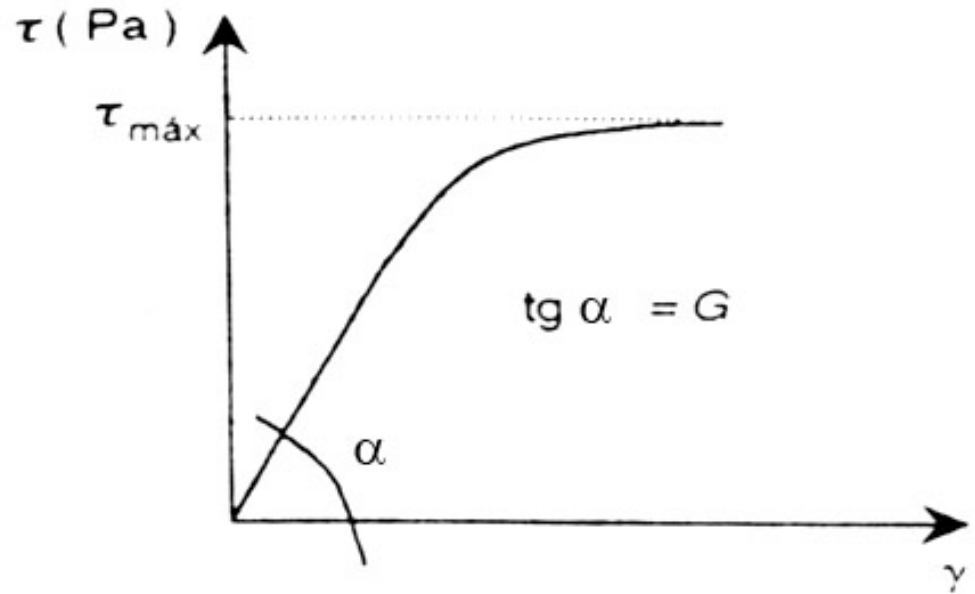


Material	Modulus of Elasticity		Shear Modulus		Poisson's Ratio
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Metal Alloys					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35

Normalmente ν varia entre 0,25 a 0,35

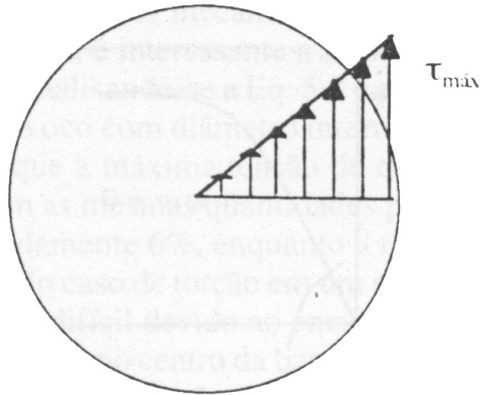
O módulo de elasticidade transversal ou o módulo de cisalhamento, G , é definido no intervalo elástico como a razão entre a tensão e a deformação cisalhante:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

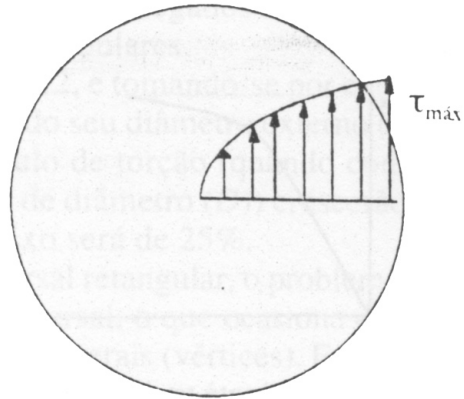


O módulo de elasticidade está relacionado ao módulo de cisalhamento por:

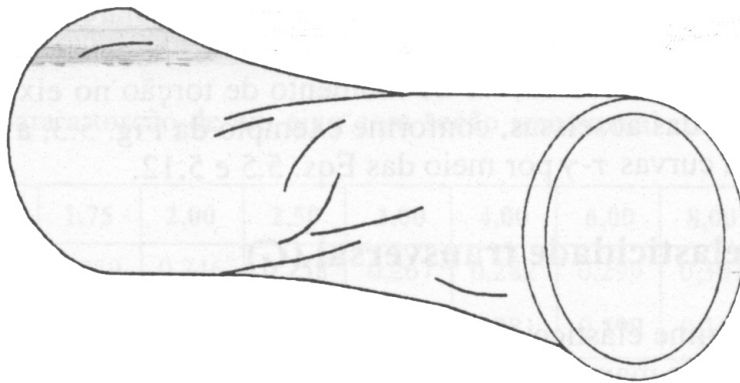
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \nu \cong 0,33 \text{ (aços)}$$



(A) Zona elástica (linear)



(B) Zona plástica (não-linear)



(C) Cambagem - Fenômeno observado na torção de tubos

O limite de escoamento é difícil de ser determinado principalmente para os mais dúcteis devido ao fato que as fibras externas estão suportadas pelas mais internas, que estão submetidas a níveis de tensão inferiores. Corpos de prova tubulares são os mais indicados para levantamento de limite de escoamento nítido.

Uma boa aproximação é feita entre os resultados obtidos pelo ensaio de torção e o ensaio de tração.

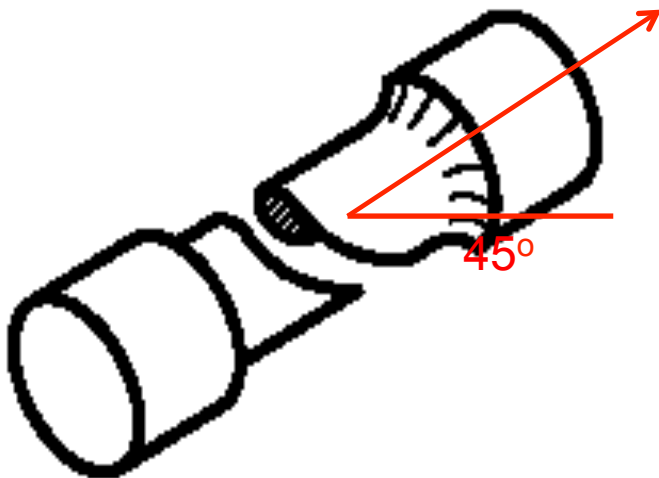
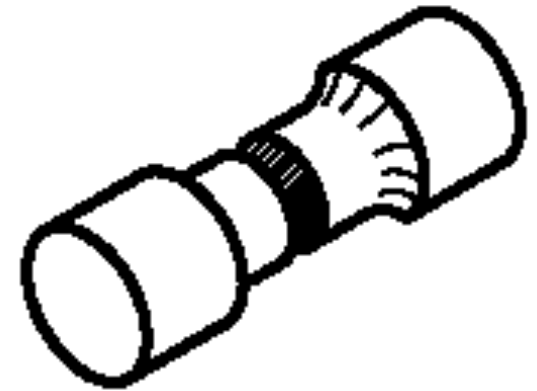
$$\tau_e = 0,6 \sigma_e \quad \text{ou} \quad \tau_R = 0,8 \sigma_R \quad \text{Materiais Dúcteis}$$

$$\tau_R = 1,3 \sigma_R \quad \text{Materiais Frágeis}$$

Diâmetro do Arame, mm	Máxima taxa de torção (rps)
Até 1,17	2
De 1,17 até 2,26	1
Acima de 2,26	0,5

As fraturas observadas no ensaio de torção são diferentes das obtidas no ensaio de tração.

Os materiais dúcteis rompem-se por cisalhamento ao longo do plano de máxima tensão de cisalhamento (geralmente um plano normal) ou plano transversal.



Os materiais frágeis rompem-se em função das tensões de tração decorrentes (plano fratura é perpendicular a tensão trativa máxima) sendo dada pela bissetriz do ângulo entre dois planos de máxima tensão fazendo um ângulo de 45° com as direções longitudinais e transversais.

Exercício



Uma barra de aço de 25,4 mm de diâmetro foi ensaiada em torção e os dados ao lado foram obtidos. Se o comprimento do corpo de prova é de 457,2 mm determine:

1. A curva $\tau \times \gamma$.
2. O módulo de ruptura.
3. Se o torque de giro no escoamento foi de 508,5 N.m. e o ângulo de giro de $2,6^\circ$, determine a tensão de escoamento em torção e o módulo de elasticidade.

no de 1/4 voltas	ângulo graus	ângulo radianos	Torque, N.m
1	90	1,570796	757
2	180	3,141592	836
3	270	4,712388	926,5
4	360	6,283184	983
5	450	7,85398	1028,2
7	630	10,995572	1096
9	810	14,137164	1152,5
12	1080	18,849552	1197,7
15	1350	23,56194	1243
18	1620	28,274328	1288,1
24	2160	37,699104	1333,3
32	2880	50,265472	1401,1
38	3420	59,690248	1423,7
39	3510	61,261044	1446,3

Bibliografia



- ❑ Ciência e Engenharia de Materiais – uma Introdução, Willian D. **Callister**, Jr. LTC 5. edição.
- ❑ The Science and Engineering of Materials, 4th ed
Donald R. **Askeland** – Pradeep P. Phulé.
- ❑ **Dieter**, G.E. Metalurgia Mecânica 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- ❑ Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos teóricos e práticos. 5º. Edição. Sérgio Augusto de **Souza**
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E588-89 (1989)**. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Metric. Philadelphia.
- ❑ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9-89a00 (2000)**. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature



OBRIGADO PELA
ATENÇÃO !!!